МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.193.1:621.165.51 DOI 10.12737/18260

Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего состояния *

В. Н. Варавка [1], О. В. Кудряков[1], И. С. Морозкин[2], И. Ю. Забияка[1] **

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Research in domain of droplet impingement erosion of the power equipment: lookback study and context analysis ***

V. N. Varavka[1], O. V. Kudryakov[1], I. S. Morozkin[2], I. Yu. Zabiyaka[1]**

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Основная цель работы — формирование научной базы для корректного определения комплекса требований к конструкционному материалу с высокой стойкостью к износу в условиях каплеударной эрозии. Выполнен обзор современного и ретроспективного состояния отечественных и зарубежных исследований в области каплеударной эрозии металлических материалов. В качестве основных итогов отмечены недостаточная фундаментальность исследований в этой области, ограниченность используемых теоретических моделей, односторонний избирательный подход многих авторов к явлению, объединяющему целый комплекс факторов различной физической природы. На этом фоне представлена авторская концепция процесса эрозионного изнашивания металла в условиях воздействия двухфазного паро-капельного потока, наблюдаемого, например, в лопаточном аппарате последних ступеней мощных паровых турбин, а также при работе газотурбинного и компрессорного оборудования. Особое внимание уделено новой научной гипотезе о влиянии активного водорода на разрушение металла при высокоскоростных капельных соударениях.

Ключевые слова: каплеударная эрозия, усталостное разрушение, кавитация, водородное изнашивание, лопатки паровых турбин, металлические сплавы, антиэрозионная защита.

The main work objective is the creation of the scientific background for correct determination of a set of requirements to the fabrication material with a high-wearing feature under the droplet impingement erosion. A review of a backward and present state of the art of the national and foreign investigations in the field of the droplet impingement erosion of metal materials is carried out. The main outcome is as follows: insufficient fundamentality of research in this area; limitation of the used theoretical models; one-sided approach of many authors to the phenomenon that combines a whole set of factors of different physical nature. On this background, the author's concept of the erosive wear process of metal under the influence of two-phase mist flow is presented. Particular attention is paid to a new scientific hypothesis of the active hydrogen effect on the fracture of metal under the hypervelocity dropwise collisions.

Keywords: droplet impingement erosion, fatigue failure, cavitation, hydrogen wear, steam turbine blades, metal alloys, antierosive protection.

Введение: материаловедческая проблематика в области повышения работоспособности теплоэнергетического оборудования. Тепловой метод генерации энергии в настоящее время занимает доминирующее положение среди существующих способов производства электроэнергии, покрывая около 70% общего мирового объема потребления. Большинство экспертных оценок сходится к тому, что, по крайней мере до середины текущего столетия ситуация вряд ли существенно изменится [1]. Устойчивости такого положения в глобальной энергетике способствует ряд факторов. Большая часть из них хорошо известна [2]. Например, доступность и достаточность сырьевой базы тепловой энергетики; её технологическая и эксплуатационная надежность; постоянно прогрессирующий рост КПД тепло-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06181).

**E-mail: varavkavn@gmail.com, kudryakov@mail.ru, mis_tm@mail.ru, zabiyakaigor@gmail.com

*** The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 15-08-06181).

энергетических установок, достигший в настоящее время для ПГУ уровня 55–60% (полвека назад он составлял чуть выше 30%). Однако есть факторы, не менее значительные, но «не лежащие на поверхности». К ним следует отнести две взаимосвязанных проблемы: глубина исследованности физических процессов, происходящих при работе энергетического оборудования, и обеспеченность энергетики надежными конструкционными материалами. Тесная взаимозависимость этих сфер очевидна — оптимальность материаловедческого решения определяется полнотой комплекса требований к материалам для изготовления оборудования и конструкций. Этот тезис может быть проиллюстрирован на примере лопаточного аппарата паровых турбин.

Общеизвестно, что идеальный КПД тепловой машины η описывается выражением: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, где T_1 и T_2 — абсолютные температуры рабочего газа и внешней среды. То есть рост КПД паровой турбины обеспечивается повышением температуры рабочего пара T_1. Реальный КПД турбины зависит не только от T_1 и T_2 и на практике значительно меньше идеального. Тем не менее, повышение температуры пара увеличивает эффективность турбины, поэтому в турбостроении в настоящее время происходит переход к массовому использованию пара с супер-сверхкритическими параметрами (35 МПа, 650 °С) взамен сверхкритического пара (24 МПа, 565 °С). За рубежом ведутся разработки [1] энергоблоков с начальной температурой пара 720°С. Следствием этого процесса является ужесточение условий работы материала узлов турбины, в частности, лопаточного аппарата. Комплекс требований включает высокую прочность, термостойкость, коррозионную стойкость (сопротивление высокотемпературному окислению), сопротивление тепловой усталости, стойкость к ползучести, минимизация по удельному весу. Такой перечень существенно ограничивает выбор материалов. Так, применение супер-сверхкритического пара закрывает дорогу к использованию большинства жаропрочных сталей перлитного и феррито-мартенситного структурных классов из-за их недостаточной термостойкости [2]. А пар с температурой 720°С уже требует перехода к многокомпонентным суперсплавам на основе никеля (система Ni-Co-W-Cr-Al-Ti-Mo) не столько из-за термостойкости, сколько по параметру стойкости к ползучести. Стойкость к ползучести таких сплавов обеспечивается наличием большого количества растворенных атомов (Co-W-Cr) и термостойких интерметаллидов (например, Ni_3Al, Ni_3Ti), реализующих твердорастворный и дисперсионный механизмы торможения дислокаций, что препятствует развитию дислокационной ползучести и диффузионной ползучести в поле напряжений (по механизму зернограничного порообразования). Коррозионная стойкость к высокотемпературному окислению приобретается за счет формирования на поверхности оксидной пленки Cr_2O_3. Термический ресурс таких сплавов составляет 1000°С, а прочность и сопротивление тепловой усталости могут быть дополнительно повышены технологическими методами. Например, при изготовлении лопаток методом литья — формированием волокнистой текстуры сплава при направленном твердении. Аналогичные принципы организации состава и структуры заложены в основе турбинных суперсплавов на основе кобальта.

Суть приведенного примера суперсплавов для лопаточного аппарата современных и перспективных паровых турбин заключается в том, что корректно определенный комплекс требований к свойствам материала, как правило, может быть реализован путем материаловедческого решения (иногда — с технологическими дополнениями).

Современная мощная паровая турбина — весьма сложный технический агрегат, состоящий из нескольких последовательных ступеней лопаточного аппарата. Тепловая динамика пара, проходящего по ступеням, приводит к существенному изменению его параметров. Сформулированный выше комплекс требований к материалу лопастей турбины касается начальных параметров пара, на заключительных же ступенях условия совершенно иные: термодинамические факторы (температура и давление) меняются настолько, что приводят к фазовому переходу — появлению капельного конденсата. Остывающий паровой поток становится двухфазным, при этом радикально меняется комплекс требований к свойствам материала лопаток. Эта проблема, заключающаяся в отсутствии универсальных подходов в решении материаловедческих задач лопаточного аппарата различных ступеней турбины, привлекает к себе меньше внимания, чем разработка конструкционных материалов для начальных ступеней с жесткими термическими условиями. Однако она тоже требует своего решения, поскольку повышение продолжительности жизненного цикла рабочего тела турбины (пара) путем увеличения числа её ступеней существенно влияет на эффективность работы и на реальный КПД турбины.

Прежде чем формулировать комплекс требований к материалу лопаток последних ступеней мощных паровых турбин, остановимся на обзоре современного состояния вопроса о главной особенности работы таких лопаток — капельных соударениях конденсата с металлической поверхностью и их следствия в виде каплеударной эрозии металла.

Ретроспективный аналитический обзор исследований в области каплеударной эрозии. Активное исследование процесса капельных соударений с металлической поверхностью началось только в конце 1960-х годов в Англии (Кембридж) и США (Лос-Аламос). Это было обусловлено двумя обстоятельствами: появлением оборудования для высокоскоростной видеосъемки и потребностью аэрокосмической отрасли в изучении процессов, происходящих в атмосфере (в двухфазной газокапельной среде) при прохождении через неё летательных аппаратов. Проблемой также интересовались метеорологи, турбиностроители, производители компрессорного оборудования. Востребованность

результатов в промышленности вызвала всплеск активности в научной среде и поток публикаций на эту тему. Первые международные конференции проводились в США и Великобритании в 1970-х годах (см., например, [3]). Явление изучалось в США (лаборатория ядерных и космических исследований в Лос-Аламосе, университеты Беркли, Колумбуса, Огайо, Кентукки, Делавера, Сан-Диего, Чикаго, Цинциннати с участием компаний Белл, Вестингауз, Дженерал Электрик, Аэроспейс), в Англии (Кавендишская лаборатория Кембриджа, университеты Манчестера, Саутгемптона, Суонси), в Швеции (университет Лулео), Франции (ONERA, Шатильон), Германии (университет в Геттингене, Dornier GmbH), Израиля (университет Хайфы), Чехословакии (Шкода, Пльзень), Японии (университет в Хиросиме, компании Мицубиси и Мазда). Обобщение накопившегося экспериментального и теоретического материала было оформлено в монографии Дж. Спринжера [4] и в фундаментальных сборниках статей под редакцией К. Прис и С. ван дер Зваага [5, 6]. В исследованиях этого периода благодаря высокоскоростной видеосъемке удалось практически полностью описать гидродинамические явления, происходящие в капле жидкости при соударении с твердой плоской поверхностью. Однако, недостаток на тот момент компьютерной базы и программного обеспечения, сложность дорогостоящих экспериментальных исследований, громоздкость и недостаточная разрешающая способность электронных микроскопов оставили нерешенными две главных проблемы: динамика капельных соударений на сложном рельефе поверхности мишени и физические процессы деградации поверхности материала при каплеударном воздействии.

Недостаточность исследовательской базы привела к появлению упрощенных, односторонних подходов в изучении этих проблем. Таким недостатком, например, страдали работы под руководством Ю. В. Полежаева, в которых развивается чисто кинетический подход к процессу определения энергии эрозионного разрушения материала преграды, без учета усталостных процессов в металле, особенностей разрушения материалов с различным уровнем механических свойств, кавитационных эффектов и влияния активного водорода. В результате был предложен расчетный аппарат полуэмпирического характера с коэффициентами, имеющими большой разброс значений и неясный физический смысл [7–9].

Отсутствие фундаментальности присуще многим современным работам, посвященным проблеме каплеударной эрозии. Так, в работах известного специалиста в области эрозии А. В. Лагерева и его сотрудников исследуются и определяются интегральные характеристики эрозионного износа различных материалов без наполнения их физическим смыслом [10, 11].

Работы под руководством М. А. Скотниковой (Санкт-Петербург) отличаются глубоким материаловедческим анализом и прекрасной металлографией каплеударных эрозионных разрушений, однако совершенно не касаются физических механизмов их формирования, оперируя только к конечному результату по принципу «post factum» [12, 13].

Особо следует отметить работы научной школы Московского энергетического института под руководством В. А. Рыженкова и Л. И. Селезнева (к которой следует отнести и известного чешского специалиста Б. Станишу), обладающей современной исследовательской базой по изучению каплеударной эрозии. Эти работы посвящены изучению кинетики эрозионного процесса и применению различных антиэрозионных материалов и покрытий. Они отличаются обилием экспериментальных, хорошо систематизированных данных. Однако теоретические подходы этой школы также не избежали ограниченности. Для изучения кинетики процесса деградации материала логично использовать энергетическую модель. Однако, зная сложность явления, энергетический подход следует, на наш взгляд, дифференцировать на составляющие. Этого в работах научной школы МЭИ не сделано, что снижает значимость теоретической модели в целом и ограничивает область её применения [14]. В работах же прикладного характера этой школы, на наш взгляд, не хватает материаловедческой составляющей — процессы эрозионной деградации поверхности материала практически не рассматриваются, а только констатируется результат испытания или эксперимента [15–20].

Из зарубежных работ последнего времени стоит отметить исследования под руководством Мин-Ку Ли (Южная Корея), посвященные напряженному состоянию и механизмам разрушения металлических материалов различной структуры при жидкокапельных соударениях. Они не претендуют на всесторонний охват сложной физической картины соударений, но достаточно полно освещают распределение напряжений в таких материалах, как хромистая сталь (12% Cr), стеллит (6B) и TiN, с учетом эффекта гидродинамической кавитации в капле при соударении. Работы отличаются высоким уровнем материаловедческого сопровождения исследований, однако обходят молчанием усталостную составляющую процесса [21, 22]. В целом же зарубежные публикации по этой теме посвящены какой-либо одной стороне процесса жидкокапельных соударений с металлической поверхностью, например, компьютерному моделированию деградации капли при ударе с анализом явления гидродинамической кавитации [23, 24], стойкости лопаточных материалов и покрытий в условиях капельной эрозии [25–27], моделированию напряжений в турбинных лопатках, изготовленных из различных материалов [28], моделированию величины давления в зоне контакта на основе энергетической модели [29, 30], сравнительной интенсивности эрозионных разрушений [31], механизмам трещинообразования в конкретных сплавах [32], сравнительным характеристикам оборудования для испытаний материалов на каплеударную эрозию [33, 34]. Характеризуя зарубежные исследования, хотелось бы выделить два обстоятельства. Во-первых, во многих зарубежных исследованиях не делается различий между эрозией металла в водном потоке (под

струей воды) и дискретным капельным потоком. Считается, что оба вида эрозии имеют единую природу. Это связано со сложностью экспериментальных установок, создающих дискретный поток с каплями регулируемого размера. Таких установок в мире очень немного, поэтому, не имея к ним доступа, некоторые исследователи идут по пути меньшего сопротивления, объединяя оба вида эрозии. В свой обзор мы не включали работы, касающиеся эрозии в сплошном или спрейерном водном потоке, поскольку её физический механизм отличен от капельной эрозии. Так, например, из обзора работ, посвященных жидкостной эрозии, выполненных в Японии в период 2008–2012 гг. [35] к каплеударной эрозии может быть причислена только одна [36], в которой исследуется аспект гидродинамической кавитации. Второе обстоятельство касается присутствия водорода в эродированных образцах, прошедших стендовые эрозионные испытания, и обнаруженного авторами экспериментально. Идея участия водорода в эрозионном процессе в зарубежных публикациях не встречается. Она является новой и подлежит серьезной экспериментальной проверке, поскольку может существенно изменить привычные представления о механизмах и кинетике эрозионных разрушений.

Обращает на себя внимание также следующий факт. После бурной публикационной активности 70–80-х годов прошлого века в последние десятилетия объем статей, посвященных каплеударной эрозии существенно сократился. Причем, по доступным публикациям нельзя сказать, что проблема полностью решена. Ни фундаментального изучения проблемы, ни исчерпывающих прикладных решений по различным её аспектам к настоящему моменту не имеется. При этом известно, что крупные компании по производству мощных паровых турбин Сименс, Вестингауз, Мицубиси, СААБ и другие имеют в своем распоряжении высококлассные лаборатории и испытательные стенды для исследования каплеударных воздействий. Ведь для производителей турбин эта проблема должна быть весьма актуальна, когда на последних ступенях турбины пар начинает остывать и конденсироваться, износ лопаточного аппарата турбины резко возрастает. Тем не менее, результаты исследований из лабораторий этих компаний в широкую научную печать не проникают. В такой ситуации Россия, как один из крупнейших производителей и потребителей энергии, большая часть которой вырабатывается именно паровыми турбинами и парогазовыми установками, находится в подчиненном положении и нуждается в самостоятельном решении проблемы повышения стойкости лопаточного аппарата мощных паровых турбин. Решение проблемы жидкокапельной эрозии металлических материалов актуально также для повышения эффективности газотурбостроения и производства компрессоров.

Таким образом, по результатам выполненного обзора напрашивается главный вывод о недостаточной фундаментальности исследований в области изучения деградации (эрозии) металлической поверхности при динамическом контакте с дискретным двухфазным потоком. Работы, посвященные этой теме, в большинстве своем касаются изучения лишь какой-либо одной стороны проблемы, что влечет за собой ограниченность теоретических подходов, не учитывающих сложность явления. Этот системный недостаток сдерживает процесс разработки методов антиэрозионной защиты и специалисты этой сферы вынуждены действовать «вслепую», подбирая различные эрозионностойкие материалы и покрытия, исходя из слишком общих соображений прочности, полагаясь только на дорогостоящие стендовые или длительные натурные испытания [17–20].

Современная концепция физических процессов при каплеударной эрозии и особенности поведения конструкционных материалов. В свете представленных выше результатов обзора и анализа состояния исследований в области каплеударной эрозии, в наших собственных исследованиях последних лет [37–43] ставилась задача формирования более полной картины изучаемого явления, чем дают представленные в обзоре источники. Полученные нами результаты показывают, что износ металлической поверхности при каплеударной эрозии развивается под действием, как минимум, трех физически различных факторов: усталостных процессов, различных видов кавитации, насыщения водородом. При этом наблюдается ряд явлений, неожиданных для таких конструкционных материалов, как, например, лопаточная сталь. Под действием циклических нагрузок капельных соударений в относительно пластичных сталях (например, аустенитные стали типа Х18Н10 или сталь 20Х13 в сорбитном структурном состоянии) по механизму перколяции развивается усталостная пористость, приводящая к формированию эрозионных кратеров. Высокий уровень напряжений в поверхностном слое металла на этой стадии обусловлен схлопыванием кавитационной полости в капле в ходе процесса гидродинамической кавитации при соударении. На последующих стадиях износа в кратерах эрозионного рельефа развивается пузырьковая кавитация, значительно интенсифицирующая износ за счет формирования эрозионных свищевых каналов. Каналы формируются на стенках эрозионных кратеров и, за счет кумулятивного эффекта при схлопывании кавитационных пузырьков внутри канала, «продавливают» канал до его выхода на поверхность стали.

На участии активного водорода в эрозионном процессе следует остановиться отдельно, поскольку это — новое направление исследований. Идея о влиянии водорода возникла после экспериментального обнаружения пузырьковых треков, которые наблюдались при опускании стальных образцов в глицерин немедленно после испытаний на эрозионном стенде. Состав выделяющихся из образцов газов не идентифицировался, но их возможный набор весьма ограничен, так как связан с диссоциацией молекул воды.

Вода является активным компонентом во многих областях техники и технологии, поэтому к настоящему времени энергетические состояния воды достаточно хорошо изучены [44–46]. Например, по данным работы [44] из вось-

ми возможных элементарных каналов диссоциации молекул воды образование атомов водорода при кавитации с наибольшей вероятностью осуществляется по реакции $H_2O \rightarrow H + OH^+ + e$. Для этого уровень энергетических затрат должен составлять 18,7 эВ (1804,55 кДж/моль). Предварительные расчеты показывают, что при гидроударе давление схлопывания тороидальной кавитационной полости в водяной капле при её контакте с металлической поверхностью обеспечивает уровень энергетической активации в зоне соударения, достаточный для диссоциации молекул воды (≈1800 кДж/моль), уже при скорости соударения ≈150 м/с [41]. Это расчетное значение практически совпадает с нижним пределом скоростей соударения, при которых в сталях начинает развиваться эрозионный износ.

Идея участия активного водорода в процессе каплеударной эрозии высказывалась в работах авторов (см., например, [43]) и на данный момент существует в виде научной гипотезы, требующей более глубокой проверки. В случае подтверждения её достоверности проблема выбора материала для лопаток последних ступеней мощных паровых турбин приобретает совершенно новый ракурс. Дело в том, что водород обладает максимально высокой диффузионной способностью в стали. Он не вступает в соединения с её основными и легирующими компонентами. Его диффузия значительно ускоряется в поле напряжений. Атомарный и ионизированный водород по дислокационным трубкам и границам зерен легко проникает в зоны концентрации напряжений и в микропустоты металла (например, заполняя усталостную пористость, о которой говорилось выше). Попадая в поры в атомарном или ионизированном состоянии, водород молизуется и в таком виде покинуть поры не может. Обладая высоким парциальным давлением, водород стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Кроме того, при соударениях происходит периодическое деформирование поверхностного слоя и объем пор изменяется. При уменьшении объема давление водорода ещё больше возрастает. Цикличность нагружения вызывает эффект накопления напряжений, нарастающий до тех пор, пока внутреннее давление в порах не вызовет разрушения стали.

Хорошо известно, что водород является причиной специфических видов разрушения стали — водородного охрупчивания и водородного изнашивания [47]. Борьба с ними представляет серьезную проблему современного материаловедения в области трения и износа. Среди признаков, определяющих водородное охрупчивание, имеются такие как: наличие растягивающих напряжений, закрепление дислокаций, растворение водорода в решетке, наличие единой (магистральной) трещины при разрушении [47–49]. При каплеударном воздействии ни один из приведенных признаков не проявляется, поэтому исследуемый процесс, вероятнее всего, относится к водородному изнашиванию. Его основным признаком является катастрофическое разрушение той области поверхностного слоя металла, где создаются условия для высокой концентрации водорода. Именно такой характер носит процесс зарождения эрозионных кратеров в местах образования усталостной пористости.

Заключение: перспективы исследований в области защиты от каплеударной эрозии. Итак, сложность материаловедческого решения проблемы каплеударной эрозии лопаточного аппарата последних ступеней мощных паровых турбин обусловлена не только многофакторностью процесса, но ещё и тем, что на каждой стадии эрозии доминирующая роль принадлежит разным участникам процесса. В начальной фазе инкубационного периода пластическая деформация и формирование деформационного рельефа происходят при циклическом механическом воздействии, усиленном влиянием гидродинамической кавитации. В заключительной его фазе начало износа, связанное с образованием первых одиночных кратеров разрушения, вызвано, по всей вероятности, механизмом водородного изнашивания. На стадии развитого эрозионного рельефа ведущую роль в эскалации износа играет пузырьковая кавитация при участии активного водорода и усталостных процессов. Синергетическое взаимодействие всех этих факторов существенно усложняет поиск универсального способа защиты поверхности металла от агрессивного воздействия дискретного водно-капельного потока. Полагаем, что акцент прикладных исследований по разработке методов антиэрозионной защиты должен быть направлен, прежде всего, на предотвращение образования усталостной пористости и развития в этих зонах металла водородного изнашивания. Это позволит сохранить целостность поверхности изделия, то есть продлить начальную стадию эрозии (инкубационный период), и не допустить (или существенно отдалить) проявление наиболее агрессивной составляющей процесса — пузырьковой кавитации, которая возникает в уже сформировавшемся эрозионном рельефе на более поздней стадии износа.

Библиографический список

1. Сравнительный анализ эффективности теплоэнергетики России и стран мира / В. Н. Артемов [и др.] // Вестник Моск. энерг. ин-та. — 2013. — № 1. — С. 9–15.

2. Клименко, А. В. Обеспечение теплоэнергетики конструкционными материалами — основа ее надежного функционирования и развития / А. В. Клименко, Е. А. Гринь // Теплоэнергетика. — 2014. — № 1. — С. 44–49.

3. Proceedings of 5th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact. — Cambridge, U.K. : Cavendish Laboratory, 1979. — 86 p.

4. Спринжер, Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости / Дж. С. Спринжер. — Москва : Машиностроение, 1981. — 200 с.

5. Эрозия / А. Эванс [и др.]; под ред. К. Прис. — Москва : Мир, 1982. — 464 с.

6. Van der Zwaag, S., Dear, J.P., Townsend, D., and Walley, S.M. Rain and solid particle erosion damage mechanisms and materials evaluations. – Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1986. AFWAL-TR-86-4.

7. Полежаев, Ю. В. Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. — Москва : Энергия, 1976. — 392 с.

8. Полежаев, Ю. В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении частицами / Ю. В. Полежаев // Инженерно-физический журнал. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 389–394.

9. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала / Ю. В. Полежаев [и др.] // Инженерно-физический журнал. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 395–404.

10. Лагерев, А. В. Вероятностное прогнозирование эрозии в системах технической диагностики влажнопаровых турбомашин / А. В. Лагерев // Изв. РАН. Энергетика. — 1997. — № 2. — С. 134–143.

11. Дергачев, К. В. Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций / К. В. Дергачев // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2001. — № 3. — С. 3–13.

12. Использование титановых сплавов в качестве материала лопаток паровых турбин / М. А. Скотникова [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3(51). — С. 61–70.

13. Ланина, А. А. Исследование высокоскоростного каплеударного воздействия на поверхность лопаток паровых турбин / А. А. Ланина // Инструмент и технологии. — 2008. — № 28–29. — С. 84–87.

14. Селезнев, Л. И. Оценка длительности инкубационного периода эрозионного износа конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 2005. — № 4. — С. 61–63.

15. Поваров, О. А. Исследование эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин / О. А. Поваров, Б. Станиша, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 1988. — № 4. — С. 66–69.

16. Оценка эрозионного износа лопаточного аппарата влажнопаровых турбин АЭС / В. А. Иванов, И. П. Фаддеев, В. М. Боровков, В. И. Королев // Сб. научн. тр. Моск. энерг. ин-та. — Москва : Изд-во МЭИ, 1999. — С. 214.

17. Селезнев, Л. И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Технология металлов. — 2007. — № 3. — С. 19–24.

18. Селезнев, Л. И. Феноменология эрозионного износа материала конструкционных сталей и сплавов жидкими частицами / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков, А. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2010. — № 9. — С. 12–16.

19. Рыженков, В. А. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин / В. А. Рыженков, А. И. Лебедева, Ал. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2011. — № 9. — С. 8–13.

20. Исследование процесса изменения характеристик рельефа поверхности лопаточной стали в инкубационном периоде развития каплеударной эрозии / А. Ф. Медников, В. А. Рыженков, Л. И. Селезнев, А. И. Лебедева // Теплоэнергетика. — 2012. — № 5. — С. 69–75.

21. Min Ku Lee, Whung Whoe Kim, Chang Kyu Rhee, and Won Jong Lee. Investigation of liquid impact erosion for 12Cr steel and Stellite 6B // Journal of Nuclear Materials. — 1998. — Vol. 257. — pp. 134–144.

22. Min-Ku Lee, Whung-Whoe Kim, Chang-Kyu Rhee, and Won-Jong Lee. An analysis of stress waves in 12Cr steel, Stellite 6B and TiN by liquid impact loading // Nuclear Engineering and Design. — 2002. — Vol. 214. — pp. 183–193.

23. Haller, K.K., Ventikos, Y., Poulikakos, D., and Monkewitz, P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 92, no. 5. — pp. 2821–2828.

24. Imano, A.M., and Beroual, A. Deformation of water droplets on solid surface in electric field // Journal of Colloid and Interface Science. — 2006. — Vol. 298. — pp. 869–879.

25. Mann, B.S., and Vivek, Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades // Wear. — 2003. — Vol. 254. — pp. 652–667.

26. Mann, B.S., Vivek, Arya, and Pankaj, Joshi. Advanced High-Velocity Oxygen-Fuel Coating and Candidate Materials for Protecting LP Steam Turbine Blades Against Droplet Erosion // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2005. — Vol. 14(4). — pp. 487–494.

27. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. — 2012. — Vol. 1, no. 3. — pp. 214–226.

28. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Yonezu, A., Xu, T., Hui, Sh., and Zhang, D. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications // Materials Transactions. — 2008. — Vol. 49, no.7. — pp. 1606−1615.

29. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Xu, T., Hui, S., and Zhang, D. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model // International Journal of Impact Engineering. — 2009. — Vol.36. — pp. 1156–1171.

30. Nicolici, S., Prisecaru, I., and Ghitescu, P. Study of fluid-structure interaction in liquid droplet impingement phenomena // U.P.B. Sci. Bull., Series D. — 2012. — Vol. 74, iss.1. — pp. 148–154.

31. Keil, T., Pelz, P.F., Kadavelil, J., Necker, J., Moser, W., and Christ, D. Droplet Impact vs. Cavitation Erosion // Proceedings of WIMRC 3rd International Cavitation Forum, 4th-6th July 2011. — UK: University of Warwick, 2011.

32. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V // Wear of Materials. — 2013. — Vol.301, iss.1–2. — pp. 442–448.

33. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities // Wear. — 2011. — Vol.271. — pp. 2625–2631.

34. Tobin, E.F., Young, T.M., and Raps, D. Evaluation and correlation of inter-laboratory results from a rain erosion test campaign // Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012.

35. Fujisawa, N., Morita, R., Nakamura, A., and Yamagata, T. Critical Consideration on Wall Thinning Rate by Liquid Droplet Impingement Erosion // Journal of Advanced Maintenance. — 2012. — Vol. 4, no. 2. — pp. 79–87.

36. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate // Wear. – 2010. – Vol.269. – pp. 310–316.

37. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 1 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 5. — С. 36–43.

38. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 2 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 6. — С. 14–19.

39. Варавка, В. Н. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2012. — № 3. — С. 45–50.

40. Кудряков, О. В. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2012. — № 10. — С. 40–47.

41. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 1 : Начальная стадия каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 1. — С. 89–99.

42. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 2 : Стадия развитой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 2. — С. 201–212.

43. Кудряков, О. В. Механизмы и закономерности деградации поверхности стали на стадиях развитой каплеударной эрозии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — № 2. — С. 100–112.

44. Маргулис, М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М. А. Маргулис. — Москва : Высшая школа, 1984. — 272 с.

45. Завилопуло, А. Н. Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Н. Завилопуло, Ф. Ф. Чипеев, О. Б. Шпеник // Журнал технической физики. — 2005. — Т. 75, вып. 4. — С. 19–24.

46. Международная база данных атомных и молекулярных констант NIST / Mallard, G., and Linstrom, P.J. NIST Standard Reference Database. — 2000. — Vol. 69. — Режим доступа: http://www.webbook.nist.gov (дата обращения : 21.10.2014).

47. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов.— Москва : Машиностроение, 1985. — 424 с.

48. Водород в металлах / под. ред. Г. Алефельд, И. Фелькель. — Москва : Мир, 1981.

49. Колачев, Б. А. Водородная хрупкость металлов / Б. А. Колачев. — Москва : Металлургия, 1985. — 216 с.

References

1. Artemov, V.N., et al. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti teploenergetiki Rossii i stran mira. [Comparative analysis of efficiency of the thermal engineering of Russia and countries of the world.] Vestnik MEI, 2013, no.1, pp. 9-15 (in Russian).

2. Klimenko, A.V., Grin, E.A. Obespechenie teploenergetiki konstruktsionnymi materialami — osnova ee nadezhnogo funktsionirovaniya i razvitiya. [Supplying thermal engineering with constructional materials is a basis of its proper operation and development.] Thermal Engineering, 2014, no.1, pp. 44-49 (in Russian).

3. Proceedings of 5th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact. Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1979, 86 p.

4. Springer, G.S. Eroziya pri vozdeystvii kapel' zhidkosti. [Erosion under the liquid droplets effect.] Moscow: Mashinostroenie, 1981, 200 p. (in Russian).

5. Evans, A., et al; Price, K., ed. Eroziya. [Erosion.] Moscow: Mir, 1982, 464 p. (in Russian).

6. Van der Zwaag, S., Dear, J.P., Townsend, D., and Walley, S.M. Rain and solid particle erosion damage mechanisms and materials evaluations. Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1986. AFWAL-TR-86-4.

7. Polezhaev, Yu.V., Yurevich, F.B. Teplovaya zashchita [Thermal protection.] Moscow: Energiya, 1976, 392 p. (in Russian).

8. Polezhaev, Yu.V. Protsess ustanovleniya erozionnogo razrusheniya materiala pregrady pri mnogokratnom soudarenii chastitsami. [Development of erosional damage to the wall under multiple particle collision.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1979, vol. 37, no.3, pp. 389 (in Russian).

9. Polezhaev, Yu.V., et al. Raschetnaya model' protsessa erozionnogo razrusheniya kompozitsionnogo materiala. [A predicted model for erosional damage to composites.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1979, vol.37, no. 3, pp. 395-404 (in Russian).

10. Lagerev, A.V. Veroyatnostnoe prognozirovanie erozii v sistemakh tekhnicheskoy diagnostiki vlazhnoparovykh turbomashin. [Probabilistic forecasting of erosion in systems of technical diagnostics of the moist-steam turbomachines.] Proceedings of the RAS. Power Engineering Journal, 1997, no. 2, pp. 134-143 (in Russian).

11. Dergachev, K.V. Elektronnaya sistema prognozirovaniya erozii rabochikh lopatok turbin atomnykh stantsiy. [Electronic forecasting system of erosion of turbine blades of nuclear power plants.] Proc. of Universities. Nuclear Power Engineering. 2001, no. 3, pp. 3–13 (in Russian).

12. Skotnikova, M.A., et al. Ispol'zovanie titanovykh splavov v kachestve materiala lopatok parovykh turbin. [Use of titanic alloys as material of the steam turbine blades.] Voprosy materialovedeniya, 2007, no. 3(51), pp. 61-70 (in Russian).

13. Lanina, A.A. Issledovanie vysokoskorostnogo kapleudarnogo vozdeystviya na poverkhnost' lopatok parovykh turbi.n [Research of high-speed droplet-shock impact on a surface of the steam turbine blades.] Instrument and Technologies, 2008, no. 28-29, pp. 84-87 (in Russian).

14. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A. Otsenka dlitel'nosti inkubatsionnogo perioda erozionnogo iznosa konstruktsionnykh materialov [Assessment of duration of the incubatory period of erosive wear of constructional materials.] Thermal Engineering, 2005, no.4, pp. 61-63 (in Russian).

15. Povarov, O.A., Stanisha, B., Ryzhenkov, V.A. Issledovanie erozionnogo iznosa rabochikh lopatok parovykh turbin [Research of erosive wear of the working blades of steam turbines.] Thermal Engineering, 1988, no.4, pp. 66-69 (in Russian).

16. Ivanov, V.A., Faddeev, I.P., Borovkov, V.M., Korolev, V.I. Otsenka erozionnogo iznosa lopatochnogo apparata vlazhnoparovykh turbin AES [Assessment of erosive wear of blade device of the moist-steam engines of nuclear power plants.] Coll. Sci.Papers. Moscow: Izd-vo MEI, 1999, p. 214 (in Russian).

17. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A. Erozionnyy iznos konstruktsionnykh materialov [Erosive wear of constructional materials.] Technology of Metals, 2007, no. 3, pp. 19-24 (in Russian).

18. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A., Mednikov, A.F. Fenomenologiya erozionnogo iznosa materiala konstruktsionnykh staley i splavov zhidkimi chastitsami. [Phenomenology of erosive wear of constructional steels and alloys by liquid particles.] Thermal Engineering, 2010, no.9, pp. 12-16 (in Russian).

19. Ryzhenkov, V.A., Lebedeva, A.I., Mednikov, Al.F. Sovremennoe sostoyanie i sposoby resheniya problemy erozionnogo iznosa lopatok vlazhno-parovykh stupeney turbin. [Current state and ways of solution to the erosive wear problem of blades of the moist-steam turbine sections.] Thermal Engineering, 2011, no.9, pp. 8-13 (in Russian).

20. Mednikov, A.F., Ryzhenkov, V.A., Seleznev, L.I., Lebedeva, A.I. Issledovanie protsessa izmeneniya kharakteristik rel'yefa poverkhnosti lopatochnoy stali v inkubatsionnom periode razvitiya kapleudarnoy erozii. [Research of changes of surface relief of blade steel in the incubatory period of droplet impingement erosion.] Thermal Engineering, 2012, no.5, pp. 69-75 (in Russian).

21. Min Ku Lee, Whung Whoe Kim, Chang Kyu Rhee, and Won Jong Lee. Investigation of liquid impact erosion for 12Cr steel and Stellite 6B // Journal of Nuclear Materials. — 1998. — Vol. 257. — pp. 134–144.

22. Min-Ku Lee, Whung-Whoe Kim, Chang-Kyu Rhee, and Won-Jong Lee. An analysis of stress waves in 12Cr steel, Stellite 6B and TiN by liquid impact loading. Nuclear Engineering and Design, 2002, vol. 214, pp. 183–193.

23. Haller, K.K., Ventikos, Y., Poulikakos, D., and Monkewitz, P. Computational study of High-speed liquid droplet impact. Journal of Applied Physics, 2002, vol. 92, no. 5, pp. 2821–2828.

24. Imano, A.M., and Beroual, A. Deformation of water droplets on solid surface in electric field. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, vol. 298, pp. 869–879.

25. Mann, B.S., and Vivek, Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades. Wear, 2003, vol. 254, pp. 652–667.

26. Mann, B.S., Vivek, Arya, and Pankaj, Joshi. Advanced High-Velocity Oxygen-Fuel Coating and Candidate Materials for Protecting LP Steam Turbine Blades Against Droplet Erosion. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, vol. 14(4), pp. 487–494.

27. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material. Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res., 2012, vol. 1, no. 3, pp. 214–226.

28. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Yonezu, A., Xu, T., Hui, Sh., and Zhang, D. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications. Materials Transactions, 2008, vol. 49, no. 7, pp. 1606–1615.

29. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Xu, T., Hui, S., and Zhang, D. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model. International Journal of Impact Engineering, 2009, vol.36, pp. 1156–1171.

30. Nicolici, S., Prisecaru, I., and Ghitescu, P. Study of fluid-structure interaction in liquid droplet impingement phenomena. U.P.B. Sci. Bull., Series D, 2012, vol. 74, iss. 1, pp. 148–154.

31. Keil, T., Pelz, P.F., Kadavelil, J., Necker, J., Moser, W., and Christ, D. Droplet Impact vs. Cavitation Erosion. Proceedings of WIMRC 3rd International Cavitation Forum, 4th-6th July 2011. UK: University of Warwick, 2011.

32. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V. Wear of Materials, 2013, vol. 301, iss.1–2, pp. 442–448.

33. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities. Wear, 2011, vol.271, pp. 2625–2631.

34. Tobin, E.F., Young, T.M., and Raps, D. Evaluation and correlation of inter-laboratory results from a rain erosion test campaign. Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012.

35. Fujisawa, N., Morita, R., Nakamura, A., and Yamagata, T. Critical Consideration on Wall Thinning Rate by Liquid Droplet Impingement Erosion. Journal of Advanced Maintenance, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 79–87.

36. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate. Wear, 2010, vol. 269, pp. 310–316.

37. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Chast' 1 [Mechanisms of forming erosive wear of metal materials at high-speed liquid droplet impacts: Part 1.] Materialovedenie, 2012, no.5, pp. 36-43 (in Russian).

38. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Chast' 2 [Mechanisms of forming erosive wear of metal materials at high-speed liquid droplet impacts: Part 2] Materialovedenie, 2012, no.6, pp. 14-19 (in Russian).

39. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Osobennosti razrusheniya metallicheskikh splavov v usloviyakh ustoychivoy kapleudarnoy erozii. [Features of destruction of metal alloys under the conditions of steady droplet-shock erosion.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki, 2012, no. 3, pp. 45-50 (in Russian).

40. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Monitoring nachal'nykh stadiy erozionnogo iznosa ionno-plazmennykh pokrytiy pri kapleudarnom vozdeystvii [Monitoring of initial stages of erosive wear of ion-plasma coatings at droplet-shock impacts.] Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya, 2012, no. 10, pp. 40-47 (in Russian).

41. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 1: Nachal'naya stadiya kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear at impact of discrete water-droplet stream. Part 1: Initial stage of droplet-shock erosion.] Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 89-99 (in Russian).

42. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 2: Stadiya razvitoy kapleudarnoy erozii [Regularities of steel wear at impact of discrete water-droplet stream. Part 2: Stage of developed droplet-shock erosion.] Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 201-212 (in Russian).

43. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy i zakonomernosti degradatsii poverkhnosti stali na stadiyakh razvitoy kapleudarnoy erozii. [Mechanisms and laws of steel surface degradation during the stages of developed droplet erosion.] Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2015, no. 2, pp. 100–112 (in Russian).

44. Margulis, M.A. Osnovy zvukokhimii (khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh) [Fundamentals of sound chemistry (chemical reactions in acoustic fields).] Moscow: Vysshaya shkola, 1984, 272 p. (in Russian).

45. Zavilopulo, A.N., Chipeev, F.F., Shpenik, O.B. Ionizatsiya molekul azota, kisloroda, vody i dvuokisi ugleroda elektronnym udarom vblizi poroga [Ionization of molecules of nitrogen, oxygen, water and carbon dioxide in electronic blow near threshold.] Journal of applied physics, 2005, vol. 75, iss. 4, pp. 19-24 (in Russian).

46. Mallard, G., and Linstrom, P.J. International database of nuclear and molecular constants NIST. NIST Standard Reference Database. 2000, vol. 69. Available at: http://www.webbook.nist.gov (accessed: 21.10.2014).

47. Garkunov, D.N. Tribotekhnika. [Tribology.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 424 p. (in Russian).

48. Alefeld, G., Felkel, I., eds. Vodorod v metallakh. [Hydrogen in metals] In 2 vol. Moscow: Mir, 1981. (in Russian).

49. Kolachev, B.A. Vodorodnaya khrupkost' metallov [Hydrogen fragility of metals.] Moscow: Metallurgiya, 1985, 216 p. (in Russian)

Поступила в редакцию 27.10.2015
Сдана в редакцию 28.11.2015
Запланирована в номер 22.02.2016